



# Reducción de la erosión en un cauce arenoso por la descarga de un canal

## Estudio experimental



**Amado Abel Jiménez Castañeda**



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

Series

**Instituto  
de Ingeniería UNAM**

Publicación arbitrada

**SID 716**

*Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco*

Publicación arbitrada

ISBN: 978-607-587-301-5

doi:10.22201/iingen.9786075873015e.2025

# **Reducción de la erosión en un cauce arenoso por la descarga de un canal**

Estudio experimental

**Amado Abel Jiménez Castañeda<sup>1</sup>**

IIUNAM

[ajc@pumas.ii.unam.mx](mailto:ajc@pumas.ii.unam.mx)

Serie Investigación y Desarrollo

SID716

Abril 2025

---

<sup>1</sup> Técnico Académico Titular C, Instituto de Ingeniería, UNAM

***Reducción de la erosión en un cauce arenoso por la descarga de un canal  
Estudio experimental***

Primera edición, 15 de abril de 2025

SID 716

D.R.© 2025 Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Ingeniería, UNAM

Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México

ISBN: 978-607-587-301-5

DOI: <https://doi.org/10.22201/iingen.9786075873015e.2025>

La obra fue editada por el Instituto de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de México (IIUNAM). El cuidado de la edición estuvo a cargo de la Unidad de Promoción y Comunicación del IIUNAM. Esta obra está gratuitamente disponible para consulta e impresión, en archivo PDF de 3.3 MB, en la sección de Publicaciones del portal electrónico del IIUNAM, <http://www.iingen.unam.mx>, desde que se terminó de editar.

Términos de licenciamiento Creative Commons para protección de la difusión por terceras personas y derechos de autor de la presente obra: Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional



## Reconocimientos y agradecimientos

El M. en I. Víctor Manuel Ortiz Martínez, con el Sr. Martín Rodríguez Valencia, se encargaron de hacer las adecuaciones en el modelo físico, para las pruebas experimentales.

Las Licenciadas J. Elizabeth Plata García, María Guillermina Sánchez Nahucatl y Suria Noemí Bustos Venegas, de la Unidad de Servicios de Información, del IIUNAM, se encargaron de conseguir algunas de las referencias consultadas.

El Dr. Mario Flores Guzmán, con el apoyo de su grupo de trabajo, hicieron el proceso del cribado de la mayor parte del material empleado para acorazar el cauce arenoso; otra parte del material para acorazamiento fue cribado por el Sr. Javier Hernández Lemus y la Sra. Norma Negrete Martínez, quienes se desempeñan en el laboratorio de Geotecnia del IIUNAM; además, la M. en I. Zaira Hernández Flores, se encargó de obtener la densidad de sólidos del material de la coraza, el ángulo de fricción interna y la curva granulométrica de la arena que se tiene en la mesa de arena que se localiza en el edificio 11 “Nave de modelos fluviales”, de la coordinación de hidráulica del IIUNAM.

El Sr. Israel García Castro, de la sección de dibujo del IIUNAM, elaboró los esquemas de las figuras, con el apoyo de la Sra. Karla Rojas García.

Al Sr. Jonathan Fernández Martínez, quien se desempeña como técnico en el Taller de Carpintería del IIUNAM, se le agradece su incondicional y oportuno apoyo en la elaboración de varias piezas útiles, que han sido muy valiosas en la instalación experimental para desarrollar las actividades experimentales presentadas en este trabajo.

Los Sres. Raúl Elizalde Naranjo y Martín Rodríguez Valencia, con la supervisión del M. en I. Víctor Manuel Ortiz Martínez, se encargaron de habilitar el modelo físico.

La Lic. Reyna Ortiz López, se encargó de adecuar el texto.

Ha sido fundamental el apoyo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, para utilizar la infraestructura que se tiene en el laboratorio de la Coordinación de Hidráulica, en el desarrollo del estudio experimental que se reporta en el presente trabajo. Muchas gracias.

*Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco*

# Resumen

Se presenta un estudio experimental para reducir y evitar la erosión local producida por la descarga de un canal revestido a un cauce arenoso. El canal pertenece a una estructura de control; en el tramo final del canal hay una expansión gradual, con sección transversal de forma rectangular, plantilla horizontal y flujo en régimen sub crítico. En el tramo de la expansión gradual, casi desde su inicio, se forma una zona de separación de flujo que ocupa del orden de la mitad del lado derecho del canal, por lo que la velocidad aumenta significativamente a lo largo de la otra mitad, en comparación con la magnitud de la velocidad media. El funcionamiento hidráulico del canal produce una fosa de erosión. Para reducir la profundidad de la fosa se realizaron pruebas experimentales con dos de las estructuras deflectoras que se recomiendan para eliminar las zonas de separación en tramos de canales con expansiones graduales. Estas estructuras suprimen la zona de separación del flujo, por lo que la distribución de la velocidad al final del tramo de la expansión gradual tiende a ser más uniforme; sin embargo, la presencia de la erosión local permanece, aunque con menor profundidad. Por ello, para evitar en su totalidad dicha erosión, se acorazó la superficie del cauce. Al final del estudio se determina el intervalo del diámetro de cribado que debe tener el material de la coraza (grava de río), tanto en el modelo físico como en el prototipo, para anular por completo el proceso de erosión local.

*Palabras clave: Expansiones graduales en canales, Separación de flujo, Deflectores, Erosión, Acorazamiento de Cauces.*

*Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco*

# Abstract

An experimental study is presented in order to reduce and avoid local erosion produced by the discharge of a lined channel into a sandy river is presented herein. The lined channel belongs to a control structure; in the final section of the channel there is a gradual expansion, with a rectangular cross section, horizontal bottom and flow in subcritical regime. In this gradual expansion, almost from its beginning, a flow separation zone is formed, which occupies about half of the right side of the channel, so that the velocity increases significantly along the other half, compared to the magnitude of the average velocity. This hydraulic behavior of the flow, with the separation zone, produces an erosion hole. To reduce the size of the hole, experimental tests were conducted with two of the deflector structures that are recommended for eliminating the separation zones in channel reaches with gradual expansions. Each of the structures employed suppress the flow separation zone, so the velocity distribution at the end of the gradual expansion reach tends to be more uniform; however, the presence of local erosion remains, albeit at a shallower depth. Therefore, in order to completely avoid such erosion, the corresponding channel surface was armored. At the end of the study, the interval of the screening diameter that the armoring material (river gravel) must have, both in the physical model and in the prototype, to completely nullify the local erosion process, is determined.

*Keywords: Gradual channel expansions, Flow separation, Baffles, Erosion, Bed Armoring.*

*Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco*

# Índice

<b>Reconocimientos y agradecimientos .....</b>	<b>iii</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice .....</b>	<b>ix</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Separación del flujo y alternativas para evitarla.....</b>	<b>7</b>
<b>3. Desarrollo de pruebas experimentales .....</b>	<b>15</b>
3.1. Prueba preliminar con un escalón gradual positivo .....	18
3.2. Estructura deflectora de tres pilas.....	20
3.3. Colocación de una coraza en la superficie del cauce.....	22
3.3.1. Tamaño de los elementos de la coraza del modelo físico .....	22
3.3.2. Cálculo del tamaño de los elementos de la coraza para el prototipo.....	27
<b>4. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>31</b>
<b>5. Referencias (citadas en este texto) .....</b>	<b>33</b>
<b>Anexo .....</b>	<b>37</b>

*Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco*

# 1. Introducción

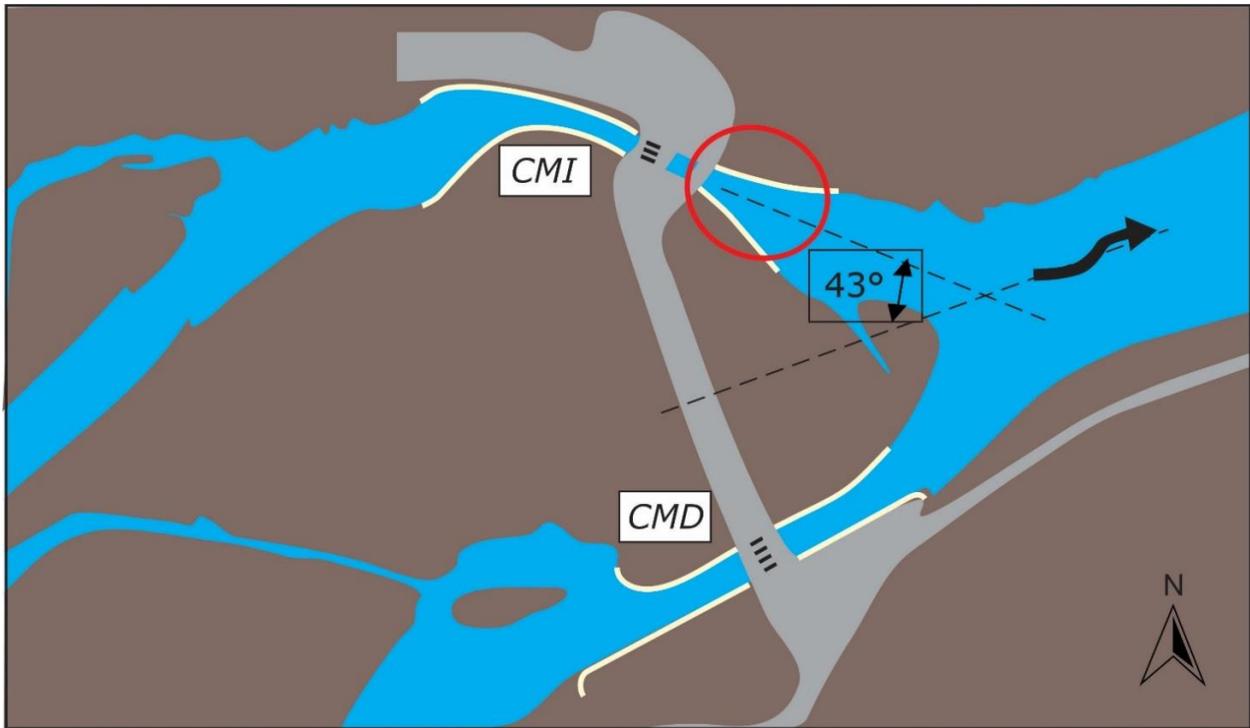
Es común que los tramos finales de los canales de descarga de sistemas hidráulicos (como riego, drenaje, generación de energía eléctrica, plantas de tratamiento de aguas residuales, obras hidráulicas para el control de avenidas, entre otros), descarguen en un cauce arenoso. Además, es normal que, en los tramos finales de los canales de descarga, haya transiciones formadas por expansiones súbitas o graduales. Otras estructuras, como las alcantarillas y los puentes carreteros y ferroviarios que se emplean en los cruces con ríos, en el tramo inmediato aguas abajo de tales obras, también hay expansiones. En las expansiones tiende a presentarse de manera natural el fenómeno de separación del flujo.

La separación del flujo en las expansiones súbitas y graduales da lugar a que se produzcan las llamadas zonas muertas o de recirculación. En el caso de las expansiones graduales, casi desde donde inicia la divergencia de las paredes laterales, con respecto al eje del canal, se produce una zona de separación del flujo; dentro de esta zona, cuando las paredes laterales tienen curvatura horizontal, se desprenden estelas de vórtices o remolinos con eje aproximadamente vertical, y el flujo tiende a concentrarse en la otra margen, lo que propicia que aumente la magnitud de la velocidad del flujo en esa parte del ancho del canal; consecuentemente, esto favorece la posibilidad de que haya un proceso de erosión local aguas abajo de la estructura en el cauce arenoso, cuya profundidad depende del tamaño de la zona de separación del flujo; desde luego, la magnitud de la erosión depende de otras variables, como por ejemplo, las características del material que constituye el cauce en el que descarga el canal. Además, la separación del flujo suele dar lugar a que el flujo erosione y/o socave alguna de las márgenes del tramo del canal que está aguas abajo de la expansión.

En este contexto, es decir, para el estudio del funcionamiento hidráulico de canales con expansiones graduales, que descargan en cauces arenosos, se dispone del modelo físico de una estructura de control conocida como El Macayo; el prototipo se localiza sobre el río Carrizal, aproximadamente a 1500 m aguas abajo de la bifurcación del río Mezcalapa en los ríos Samaria y Carrizal, en el estado de Tabasco, México. En la Figura 1.1 se incluye un esquema que es útil para ubicar el tramo del cauce a estudiar en este trabajo.

La estructura de control está integrada por una cortina y dos canales de descarga en sendas márgenes: el canal de la margen izquierda (CMI), mostrado en la parte superior de la Figura 1.1, y el canal de la margen derecha (CMD); en cada canal se tiene un conjunto de compuertas radiales, colocadas en paralelo, que están apoyadas por pilas. En la misma Figura 1.1 se indica, enmarcado con color rojo, el tramo final del CMI; ahí se nota la expansión gradual de ese tramo.

En cuanto a la orientación del CMI, con respecto al cauce del río Carrizal, el eje del tramo de la expansión en la descarga, forma un ángulo de  $43^\circ$  con respecto al eje del cauce (ver Figura 1.1).



**Figura 1.1** Ubicación del CMI en la estructura de control El Macayo. *Fuente: elaborada por el autor*

El modelo físico fue construido en el Edificio 11 (Nave de Modelos Fluviales), del II-UNAM. El modelo ocupa una superficie rectangular de casi  $9.50\text{ m}$  de ancho y  $28.50\text{ m}$  de longitud, cuya área es del orden de  $270\text{ m}^2$  (ver Figura 1.2); la escala geométrica del modelo es 1 a 60, sin distorsión.

Se dispone de una bomba con capacidad de 25 HP y un tanque de carga constante, que forman parte del sistema de recirculación de agua, para hacer que ingrese un caudal constante al modelo físico; el caudal se aforó con un vertedor rectangular de pared delgada, sin contracciones laterales; el ancho de la cresta es de  $1.20\text{ m}$ . El cálculo del caudal durante los experimentos se calcula con la fórmula de Rehbock (Sotelo, 1976). En la Figura 1.3 se incluye tanto la placa del vertedor, como el limnómetro empleado para medir la carga sobre la cresta del vertedor; la distancia entre el limnómetro y la cresta del vertedor es de  $2.4\text{ m}$ .



**Figura 1.2** Superficie ocupada por el modelo físico de la estructura de control el Macayo. *Fuente: foto tomada por el autor*



**Figura 1.3** Vertedor y limnómetro empleados para aforar el caudal que ingresa al modelo. *Fuente: foto tomada por el autor*

En la Figura 1.4 se presenta con mayor detalle la estructura de control en el modelo físico.



**Figura 1.4** Modelo físico de la estructura de control El Macayo. *Fuente: foto tomada por el autor*

La Figura 1.5 es útil para mostrar con mayor detalle el CMI; ahí se observa la pared izquierda a lo largo del canal y se indica el sentido del flujo.



**Figura 1.5** Modelo físico del CMI. *Fuente: foto tomada por el autor*

Este canal se distingue por tener un canal de llamada, con curvatura y plantilla horizontales; la forma de la sección transversal con la que inicia el canal es trapezoidal asimétrica, es decir, el ángulo de inclinación del talud de la margen izquierda, al inicio del canal, es menor que el del talud de la margen derecha; a lo largo del tramo con curvatura horizontal, el ancho de la plantilla del canal se reduce de manera gradual, desde casi 1.5 m, hasta 0.275 m.

El canal continúa con un tramo recto, en el que la sección transversal es de forma rectangular; en la parte final del tramo recto, se tienen dos pilas que permiten apoyar un conjunto de compuertas radiales.

Después, la plantilla del canal tiene una curva vertical, y continúa con un tramo recto, que es conectado con otro tramo en el que se tiene la expansión gradual, cuyas paredes siguen siendo verticales y la plantilla horizontal; las paredes laterales tienen un ángulo de divergencia, con respecto al eje del canal, de  $\theta \cong 12.5^\circ$ , que es el recomendado por Hinds (1928). Por otra parte, Jiménez (2023) incluye la descripción de las dimensiones de cada canal y de los conjuntos de las compuertas radiales y las pilas.

Las características geométricas del CMI dan lugar a que el flujo tenga el comportamiento siguiente: la presencia de la curvatura horizontal en la entrada del canal favorece la formación del flujo helicoidal; aguas abajo de las pilas, se presenta un salto hidráulico, por ello, el flujo que continua hacia aguas abajo es tridimensional. Durante el funcionamiento hidráulico del modelo físico se observó que, casi al inicio del tramo de la expansión gradual, se forma una zona de separación del flujo, cuyo ancho llega a ocupar aproximadamente la mitad del ancho del canal, como se indica con el esquema de vectores velocidad incluidos en la Figura 1.6.



**Figura 1.6** Esquema de la distribución de velocidades en la zona de separación del flujo. *Fuente: foto tomada por el autor*

En la zona de separación el flujo es recirculante, con ingreso y salida de flujo de la zona de separación, y presencia de remolinos de eje casi vertical que se desprenden de la pared, y que giran en sentido contrario a las manecillas de reloj; así, el flujo principal se concentra en la mitad del lado izquierdo del canal, a lo largo de la expansión. La dirección con la que el CMI confluye con el cauce y la presencia de la zona de recirculación mostrada en el esquema de la Figura 1.5, favorecen que el flujo que descarga el canal al cauce, tienda hacia la margen izquierda del río; por todo esto, aumenta la velocidad con la que el flujo erosiona el cauce en la descarga, hasta formarse una fosa de profundidad considerablemente mayor, comparada con la que se tendría en el caso de que la distribución de la velocidad fuera más uniforme en la sección final del canal revestido; esto se demuestra en las pruebas experimentales que se describen en el capítulo tres.

Caballero, Mendoza, Berezowsky & Jiménez (2023) presentan un estudio numérico - experimental de la hidrodinámica y de la erosión del cauce en la descarga del CMI; durante el correspondiente estudio experimental, no se colocó ningún tipo de deflector en el tramo de la expansión gradual, y la elevación del cauce arenoso en la descarga fue igual al de la plantilla del canal en su extremo final, como condición inicial del estudio. En sus conclusiones, Caballero *et al.*, (2023) indican la aproximación que se logra en el cálculo de la hidrodinámica en la expansión, así como también las diferencias obtenidas al comparar los resultados del sistema de modelación matemática con las mediciones registradas en el modelo físico. El campo de velocidades calculado y las observaciones hechas en el modelo físico, en el tramo de la expansión gradual y en la descarga del CMI, permiten indicar que los resultados de la modelación matemática representan de manera suficientemente aproximada lo que ocurre en el modelo físico (ver la Figura 7.a que se incluye en Caballero *et al.*, (2023). Este comportamiento del flujo también se indica en el esquema del campo de velocidades mostrado en la Figura 1.7.



**Figura 1.7** Esquema del flujo en las zonas de recirculación, en la descarga de los canales. *Fuente: foto tomada por el autor*

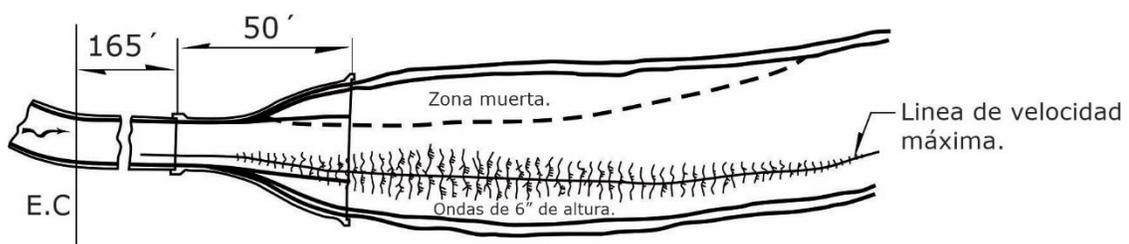
Un estudio similar al de Caballero *et al.*, (2023), publicado recientemente, es el presentado por Li (2024); en particular, en este trabajo se reporta el cálculo del esfuerzo que interviene en la zona de erosión, de manera diferente al criterio de Shields (1936).

En este contexto, el presente trabajo consiste en describir los estudios enfocados para mejorar el funcionamiento hidráulico del tramo final del CMI, en el que se tiene la expansión gradual. Se trata que la distribución de la velocidad a lo ancho y largo del tramo de la expansión gradual tienda a ser más uniforme; para ello, se emplean dos de las estructuras deflectoras de flujo que son recomendados para evitar o reducir la zona de separación del flujo en expansiones graduales.

## 2. Separación del flujo y alternativas para evitarla

Es notable la cantidad de estudios publicados, en los que se incluye el estudio y diseño hidráulico de transiciones; en el caso de expansiones graduales se trata de evitar la formación de zonas muertas o de recirculación del flujo, es decir, suprimir o reducir el fenómeno de separación del flujo. En algunos documentos se tratan las transiciones para conectar canales con secciones de forma rectangular a trapecial; en otros se emplean transiciones en las que la sección transversal cambia de la forma circular a trapecial; en el caso que se estudia en este trabajo prevalece la forma rectangular a lo largo de la transición; por ello, a continuación se comentan principalmente los estudios que se han desarrollado para transiciones en canales de sección rectangular, con expansión gradual y flujo en régimen sub crítico.

Uno de los primeros trabajos publicados en este contexto es el de Hinds (1928), ampliamente citado. En uno de los apartados, Hinds reporta el comportamiento del flujo en una expansión alabeada, empleada para conectar un canal revestido de sección rectangular con otro de forma trapecial, no revestido. En la Figura 2.1, presentada originalmente por Hinds (1928, p. 1457), se indica la presencia de una zona muerta en la margen izquierda del canal, cuyo fenómeno también es conocido como separación del flujo; la separación inicia casi al principio de la transición, y termina en el canal no revestido, aproximadamente a cuatro veces la longitud de la transición.



**Figura 2.1** Zona de separación en la expansión alabeada de un canal (texto traducido por el autor)

En este caso se considera que la formación de la zona muerta es inducida por la presencia de la expansión gradual, pero también contribuye el flujo helicoidal producido por la curvatura horizontal que tiene el canal aguas arriba de la expansión.

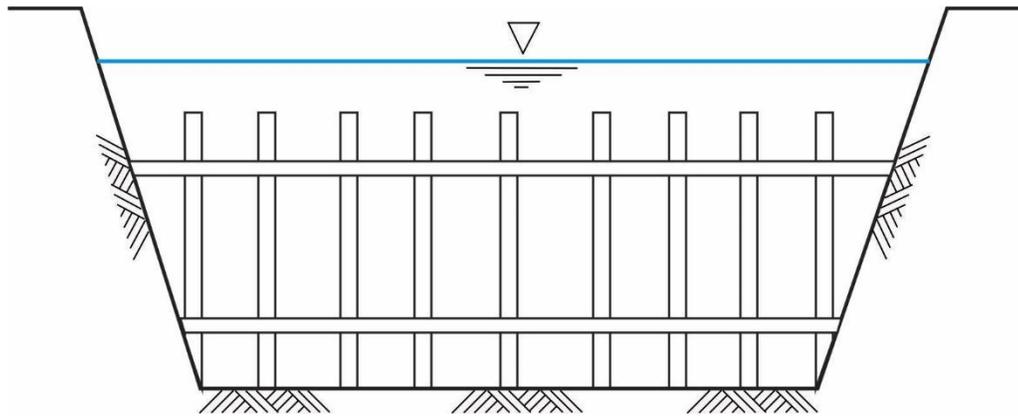
En cuanto a las transiciones alabeadas propuestas por Hinds (1928), Smith & Yu (1966) indican que el funcionamiento hidráulico de la expansión alabeada es notablemente cuestionable, pues además del alto costo de construcción, debido a su excesiva longitud, el funcionamiento hidráulico no es adecuado. Skogerboe, Austin & Bennet (1971), indican que en los años de 1961 y 1962, Haszpra publicó un diseño de expansiones graduales, que es notablemente mejor que el de la transición alabeada propuesta por Hinds (1928).

Haque (2008) comenta que Nikauradse realizó en 1962, experimentos en un canal de laboratorio, con sección rectangular y paredes convergentes y divergentes; en una de sus conclusiones reportó que en las expansiones con ángulo total menor o igual que  $8^\circ$ , no hubo presencia de zonas de separación entre el flujo y las paredes laterales del canal. Desafortunadamente, en las referencias de Haque (2008) no se tiene incluida la de Nikauradse. Otro estudio similar es el de Mazumder & Darde (1994), quienes también realizaron experimentos en laboratorio; sus ensayos los desarrollaron en un canal de sección rectangular; en una de sus conclusiones indican que en el caso de que la plantilla del canal tenga pendiente adversa en el tramo de la expansión gradual, con cualquier ángulo total de divergencia de las paredes, no hay presencia del fenómeno de separación del flujo.

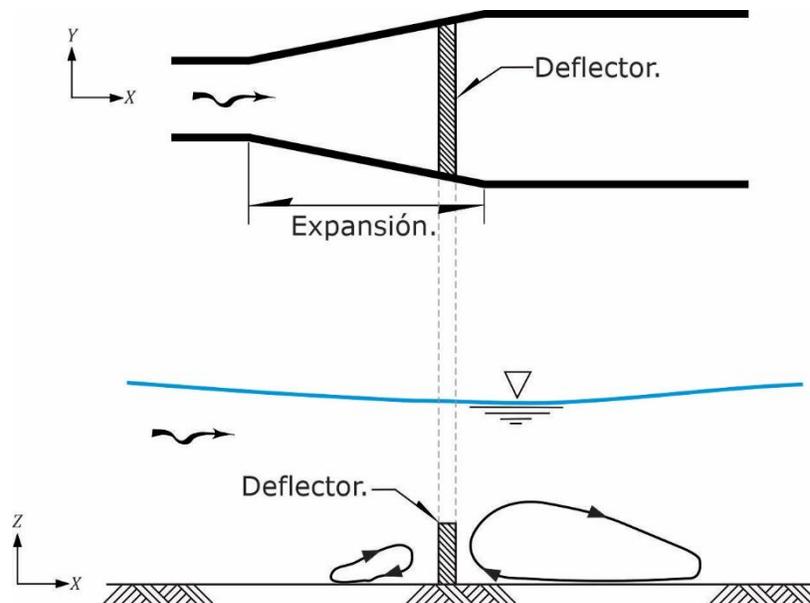
Otro de los primeros trabajos en los que se hace una descripción detallada de las características del flujo en la expansión gradual de un canal de sección rectangular, es el de Thomas (1940); este trabajo es comentado por Skogerboe *et al.* (1971). Thomas (1940), además de presentar una explicación del fenómeno de separación del flujo, destaca la formación de zonas de recirculación asimétricas en la expansión simétrica de un canal. Reconoce las contribuciones de Ludwig Prandtl, con respecto al concepto de la capa límite y el fenómeno de separación del flujo, quien publicó por primera vez el concepto de capa límite en Prandtl (1905).

Thomas (1940), también indica que en ese tiempo se conocían cuatro alternativas para evitar la separación del flujo en la expansión gradual de un canal; para ello se empleaban las estructuras siguientes: rejas en la sección transversal (Figura 2.2); deflector o bloque estabilizador, que consisten en colocar un umbral con forma de prisma rectangular, continuo o dentado, a lo ancho de la plantilla (Figura 2.3); y vanos, también llamados muros deflectores o muros guía. Thomas (1940) comenta las ventajas y desventajas que tiene cada una de las alternativas de deflectores indicados con respecto al funcionamiento hidráulico.

Además, Thomas (1940) indica que el organismo Central Board of Irrigation (India), en su publicación No. 10 del año 1935, propone otra alternativa que se había estado utilizando desde décadas, para evitar la formación de separación del flujo en canales con paredes divergentes, la cual consiste en colocar un escalón gradual positivo en la plantilla del canal, a lo largo de la transición (Figura 2.4).



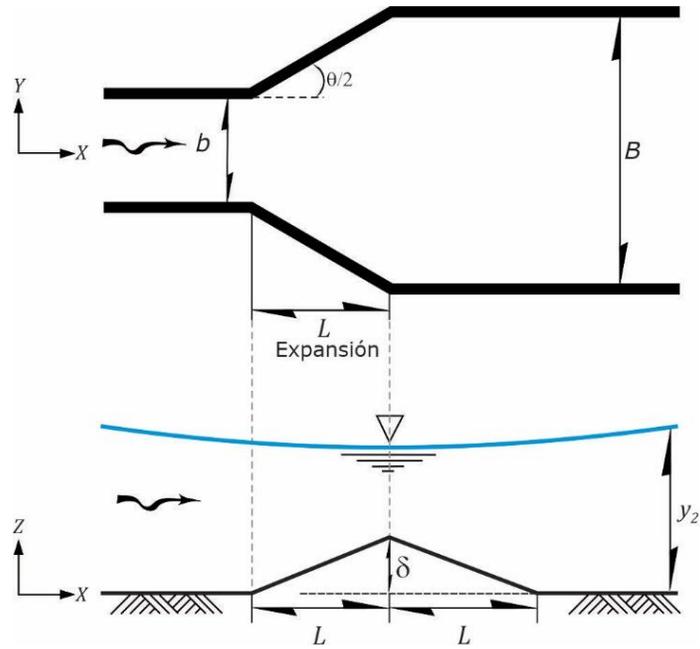
**Figura 2.2** Rejilla para estabilizar el flujo (Thomas, 1940)



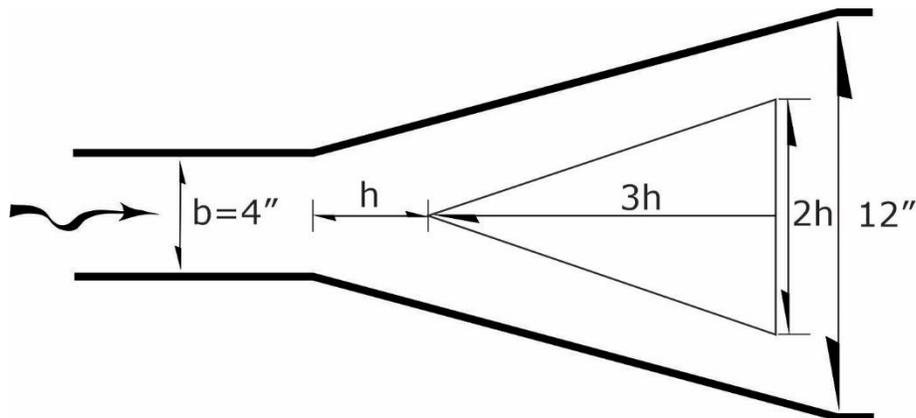
**Figura 2.3** Deflector estabilizador (Ramamurthy, Basak & Rao, 1970; simplificada y traducida por el autor)

Como ejemplos del empleo de esta alternativa (Figura 2.4), se tienen las publicaciones de Seetharamiah & Ramamurthy (1968), Ramamurthy, Basak & Rao (1970), Najafi-Nejad-Nasser & Li (2015) y Najmeddin & Li (2016).

En el trabajo académico publicado por Hashimi (1966) se reportan los estudios experimentales en transiciones súbitas y graduales; las graduales con paredes verticales rectas y con curvatura compuesta en planta, con y sin bloques difusores, con y sin vanos difusores, y también se incluye el efecto de colocar un tetraedro (con altura  $h$ ), en la plantilla del canal, en el tramo de la expansión gradual, como se indica en el esquema de la Figura 2.5. En el tetraedro,  $h$  es aproximadamente igual a la mitad del tirante que se tiene aguas abajo de la transición.

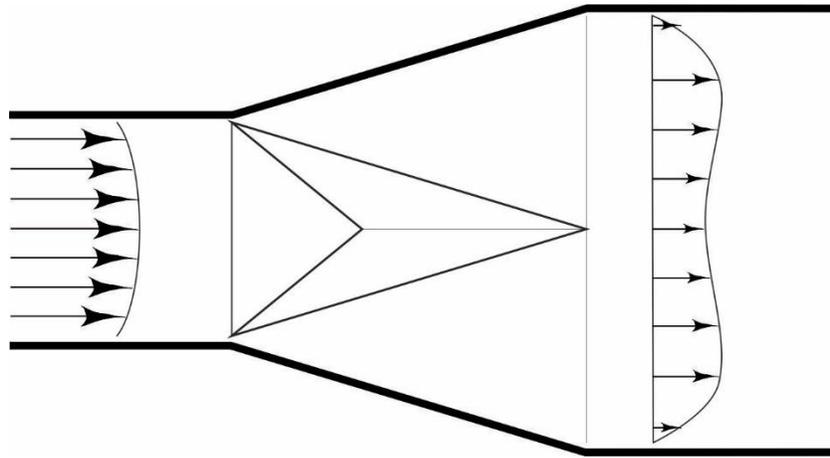


**Figura 2.4** Deflector de flujo del tipo escalón positivo gradual. Fuente: esquema elaborado por el autor



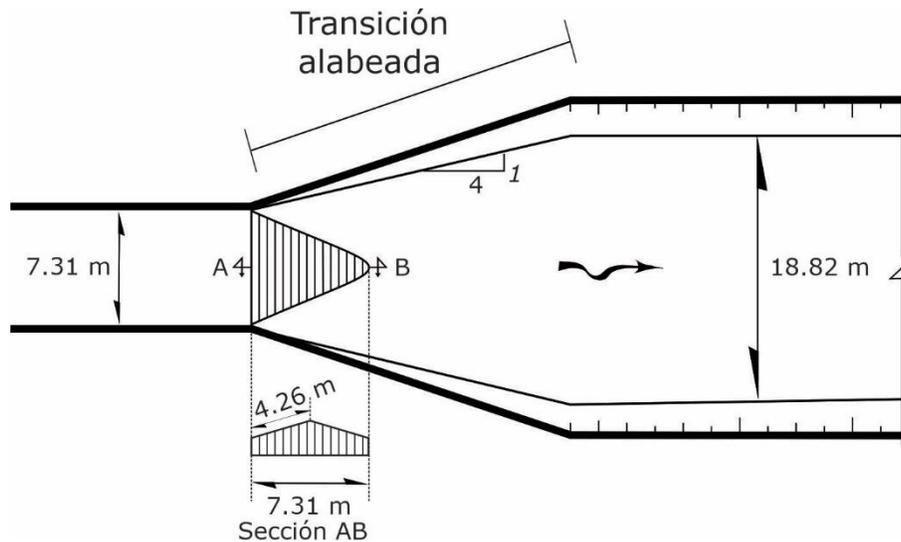
**Figura 2.5** Tetraedro propuesto por Hashimi (1966)

Rao & Seetharamaiah (1969) presentan estudios experimentales con diferentes estructuras para evitar la separación del flujo en expansiones graduales; una de las estructuras se distingue por tratarse de un triedro colocado sobre la plantilla al inicio de una expansión gradual, como se observa en la Figura 2.6, lo que permite evitar la separación del flujo en una expansión gradual. Desafortunadamente, en el esquema no se incluyen las dimensiones del triedro, pues solo se presenta un esquema del obstáculo.



**Figura 2.6** Triángulo propuesto por Rao & Seetharamaiah (1969)

Mishra (1977) indica que en el Annual Report for 1951 (Tech. Publication No. 8), del organismo Irrigation Research Station Poondi, Madras, India, se recomienda colocar un obstáculo como el mostrado en la Figura 2.7, en la plantilla del canal, al inicio de una expansión del tipo alabeada, para evitar la separación del flujo.

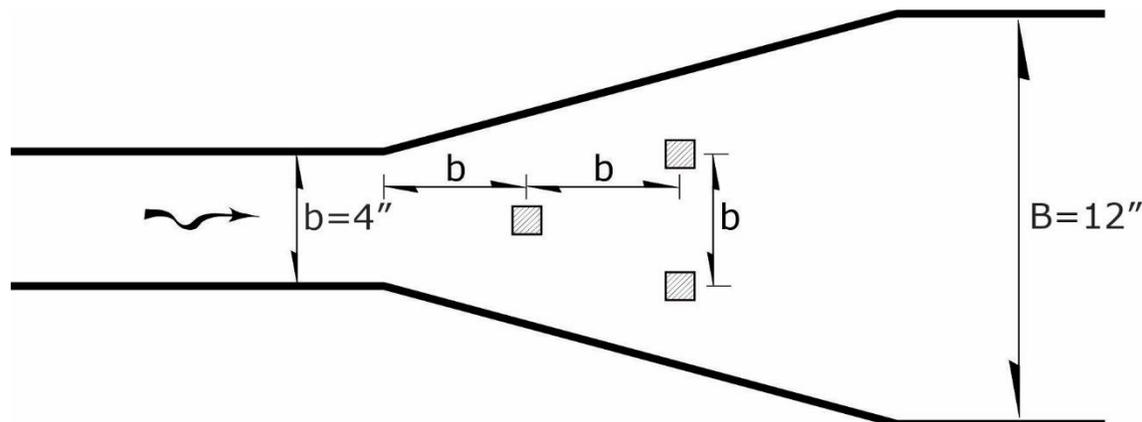


**Figura 2.7** Deflector de fondo (tipo joroba), colocado al inicio de una expansión alabeada (Mishra, 977)

Se han publicado otros métodos para diseñar expansiones graduales de canales con sección transversal de forma rectangular y flujo en régimen sub crítico; un grupo de esos métodos se distingue por incluir formulaciones que definen la curvatura horizontal que deben tener los muros laterales del canal en el tramo de la expansión, y así evitar la separación del flujo con respecto a las paredes laterales del canal. Ejemplos de estos métodos están presentados en: Hartley, Jain & Bhattacharya (1940), Mitra (1940),

Isbash & Lebedev (1961), Chaturvedi (1963), Garde, Ranga Raju & Misra (1979), Nashta & Garde (1988), Swamee & Basak (1991), Alauddin & Basak (2006) y Basak & Alauddin (2010). Sin embargo, Formica (1955) y Smith & Yu (1966) indican que una expansión con paredes rectas funciona mejor que una expansión con paredes curvas. En particular, como respuesta a la discusión de Mazumder (1988), Nashta & Garde (1988) reconocen que de todas las geometrías propuestas para el diseño de la expansión gradual de un canal rectangular, cuyos muros tienen curvatura en planta, la propuesta por Isbash & Lebedev (1961) es la mejor.

Otra alternativa empleada para evitar la separación del flujo consiste en colocar pilas como se indica en la Figura 2.8; las pilas deben tener secciones cuadradas en planta, cuyos lados deben ser de  $0.18 b$ , y su altura debe de ser igual a la del tirante. Este tipo de colocación de los bloques fue propuesto por Smith & Yu (1966), y empleado en el estudio académico desarrollado por Hashimi (1966). Las ventajas que se tienen al emplear esta estructura son: se elimina la zona de separación del flujo, la estructura disipa energía cinética del flujo y permite disminuir la longitud de la transición.



**Figura 2.8** Colocación de pilas como deflectores de sección cuadrada ( $B/b = 3$ ) (Smith & Yu, 1966)

En particular, en una de las conclusiones de Smith & Yu (1966) se indica que es mejor emplear paredes rectas que paredes con curvatura horizontal en las transiciones. Esta publicación fue ampliamente discutida, pues se presentaron varias discusiones: Skogerboe & Hyatt (1966), Soliman (1966), Rao, Galay & Nimmo (1966), Kulandaiswamy & Narayanan (1967), entre otras. En general, quienes discuten el trabajo indican que no están de acuerdo con Smith & Yu (1966); por ejemplo, Kulandaiswamy & Narayanan (1967) aclaran que los resultados experimentales de Chaturvedi (1963) y Narayanan (1963), quienes emplearon paredes definidas por curvas con forma hiperbólica, les permitieron deducir que el funcionamiento hidráulico de estas geometrías es mejor que las paredes rectas en las expansiones graduales.

En los estudios desarrollados y publicados por Mazumder S. K., con respecto al flujo en expansiones graduales de canales con régimen subcrítico, se incluyen algunas de las alternativas que han sido propuestas para disminuir o evitar la presencia de la separación del flujo. Por ejemplo, en

Mazumder (1967) y Mazumder & Rao (1971), se estudia la influencia de emplear vanos sumergidos de forma trapecial; en Mazumder & Darde (1994) se presenta el efecto que se tiene en la zona de separación al colocar un escalón gradual positivo a lo largo de la expansión de un canal de sección rectangular. En Mazumder & Pramod Kumar (2001) se incluye una manera de clasificar al flujo en transiciones, en función del ángulo central de divergencia de las paredes de la expansión del canal.

Swamee & Basak (1991) presentan cuatro de los métodos más empleados para diseñar la expansión gradual de un canal rectangular; además, se propone una nueva metodología para obtener un mejor diseño de la expansión gradual; ésta se distingue porque se emplean modelos numéricos para definir tanto el ancho de la plantilla como la elevación de la misma a lo largo de la expansión. Desafortunadamente, no se presenta algún estudio experimental que permita avalar el nuevo método de diseño y no incluyen el método propuesto por Isbash & Lebedev (1961).

Los estudios más recientes con respecto a las expansiones graduales en canales con flujo en régimen sub crítico se basan en trabajos experimentales: Ramamurthy *et al.* (2017) emplean una transición alabeada y el efecto de la inclusión de uno y tres vanos; Thapa, Li & Ramamurthy (2018) utilizan en sus experimentos la transición en cuña, con modificaciones; Li, Thapa & Ramamurthy (2019) recurren nuevamente a la transición alabeada, pero con vanos que tienen forma alabeada. En cada uno de estos estudios se tratan transiciones de canales rectangulares a trapeciales. En particular, el artículo de Li *et al.*, (2019) es cuestionable, por la construcción de los vanos en forma alabeada, y su funcionamiento en obras hidráulicas para el control de avenidas.

La revisión de los trabajos publicados permite notar que el fenómeno de la separación del flujo en tramos de canales con expansiones graduales no está totalmente resuelto. En la actualidad, para un estudio particular es recomendable utilizar, de manera simultánea, tanto sistemas de modelación matemática para flujos del tipo tridimensional (3D), como estudios experimentales.

*Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco*

### 3. Desarrollo de pruebas experimentales

En el modelo físico se dispone de arena volcánica negra para representar el material del cauce arenoso. Por un lado, la granulometría de la arena volcánica es casi uniforme, con diámetro de cribado  $D_{50} \approx 0.2 \text{ mm}$ ; por otro lado, se sabe que la arena del río Carrizal tiene diámetro  $D_{50} \approx 0.45 \text{ mm}$  (López, 2024), no cumple con la escala geométrica del modelo físico; esto siempre es así en los modelos de fondo móvil; por ello, es necesario considerar que las dimensiones de la erosión local registradas al final de cada una de las pruebas experimentales, representan un porcentaje de las magnitudes de erosión que se tendrían en el prototipo; así, se trata de encontrar la alternativa que anule por completo el proceso de erosión local en el modelo físico, y que con base en esos resultados, sea adecuado proponer una solución para el prototipo.

En Caballero *et al.*, (2023), se describe de manera detallada el estudio numérico – experimental del funcionamiento hidráulico de CMI, y su efecto en la erosión producida en la descarga del CMI al lecho arenoso, sin incluir ninguna estructura deflectora a lo largo de la expansión gradual, ni la protección del lecho del cauce en la zona de erosión local. La Figura 3.1 es útil para mostrar el funcionamiento hidráulico del CMI, con el caudal de diseño, en la que se nota que hay sedimento en la plantilla del lado derecho, que es donde se tiene la zona de separación de flujo (círculo en color rojo). Dicho material depositado, permanece durante toda la prueba experimental.

En la Figura 3.2 se presenta el resultado final del proceso de erosión local que se tiene en el caso estudiado por Caballero *et al.*, (2023); ellos reportan que la profundidad máxima de la fosa de erosión local, en el modelo físico, es del orden de 0.095 m. En la fotografía se nota el material arenoso que permaneció durante la prueba experimental, en la zona de separación del flujo.

El desarrollo del presente estudio experimental consiste en determinar el efecto que se tiene en las dimensiones de la erosión local del cauce, al emplear dos tipos de estructuras deflectoras: una de ellas consta de una rampa; la otra de tres pilas con sección transversal cuadrada; además, se incluye la colocación de una coraza en el lecho para evitar la erosión en el modelo físico.

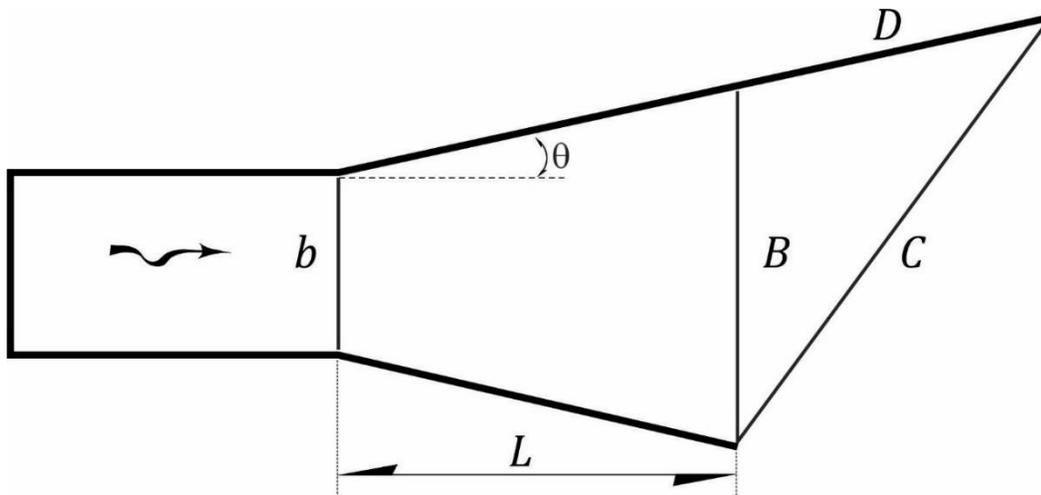


**Figura 3.1** Funcionamiento hidráulico del CMI, con el caudal de diseño. *Fuente: foto tomada por el autor*



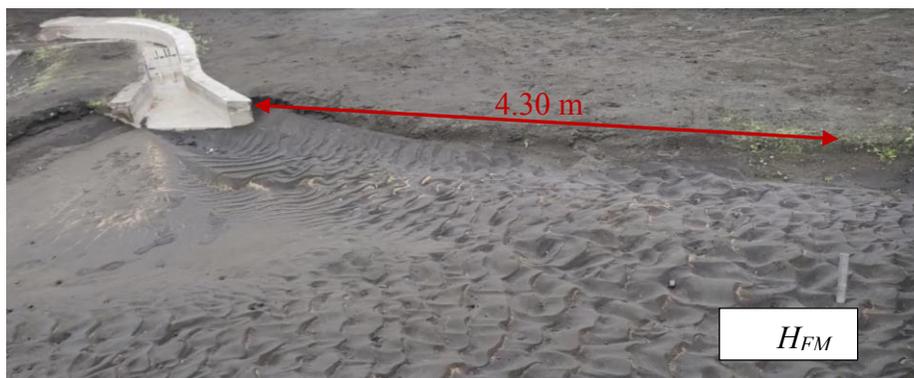
**Figura 3.2** Erosión local sin ningún tipo de estructura deflectora o coraza en el CMI. *Fuente: foto tomada por el autor*

El tramo de la expansión gradual se distingue por tener la geometría mostrada en la Figura 3.3; ésta inicia con ancho de plantilla  $b = 0.27 \text{ m}$ , y finaliza con ancho  $B = 0.54 \text{ m}$ ; las paredes laterales divergen con ángulo  $\theta \cong 12.5^\circ$ ; la distancia entre los anchos  $b$  y  $B$  es  $L = 0.62 \text{ m}$ ; además, la expansión gradual continúa con una superficie horizontal de forma triangular, en la que el lado de mayor longitud es  $C = 0.80 \text{ m}$ , y el lado que colinda con la margen izquierda es  $D = 0.47 \text{ m}$ . La plantilla a lo largo y ancho de todo el tramo de la expansión es horizontal y las paredes laterales son verticales.



**Figura 3.3** Geometría en planta del tramo de la expansión gradual. Fuente: esquema elaborado por el autor

Las pruebas experimentales se desarrollaron con caudal  $Q = 30.48 \text{ l s}^{-1}$ , que corresponde al gasto de diseño del prototipo de  $850 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (puesto que la escala geométrica del modelo es 1:60), con las compuertas radiales totalmente abiertas. El caudal de ingreso al modelo físico fue medido con un vertedor rectangular de cresta delgada y sin contracciones laterales. Con respecto a la condición de frontera aguas abajo, se emplea una compuerta abatible, con la que se establece el nivel de la superficie libre del agua en el centro del cauce arenoso, aproximadamente a 4.30 m aguas abajo de donde termina el extremo del lado izquierdo de la expansión gradual (ver Figura 3.4).



**Figura 3.4** Sitio de medición del nivel del agua (condición de frontera aguas abajo). Fuente: foto tomada por el autor

Como referencia de elevaciones, la plantilla del tramo inicial del CMI es de 12 *msnm* (en el prototipo), por lo que la correspondiente elevación de la plantilla en el modelo físico es de  $12/60 = 0.20 \text{ m}$ , y en el tramo de la expansión gradual, la plantilla tiene la elevación 0.165 *m* en el modelo físico; se sabe

que para la condición de diseño, el nivel del agua en el prototipo, en el tramo aguas abajo de la estructura de control, es  $H_F = 16.50 \text{ msnm}$ , por lo que en el modelo físico el nivel de la superficie libre del agua debe ser  $H_{FM} = 0.275 \text{ m}$  (ver Figura 3.4); así, esta última elevación debe estar  $0.075 \text{ m}$  por arriba de la elevación de la plantilla con la que inicia el CMI, en laboratorio.

Al inicio de cada prueba experimental, se hizo coincidir la elevación del cauce arenoso con el de la plantilla del canal en la descarga, como se ilustra en la Figura 3.5, en condiciones de fondo plano.



**Figura 3.5** Condiciones iniciales de la superficie arenosa que recibe la descarga de la expansión. *Fuente: foto tomada por el autor*

### 3.1. Prueba preliminar con un escalón gradual positivo

La forma geométrica en planta del tramo de la expansión gradual, no permite que se utilice la forma geométrica tradicional del escalón gradual, ascendente – descendente, que se recomienda normalmente, como se ilustra, por ejemplo, en Najmeddin & Li (2016), ver también la Figura 2.4; además, las observaciones hechas durante el desarrollo de las pruebas experimentales realizadas por Caballero *et al.*, (2023), en las que se notó que el flujo se concentra en el lado izquierdo de la mitad del canal, a lo largo del tramo de la expansión gradual, permiten proponer que el plano de la rampa ascendente del escalón debería tener pendiente adversa al flujo, en dirección oblicua con respecto al eje de simetría de la transición gradual; por ello, se propuso una rampa que comenzara con la misma elevación que tiene la plantilla del canal al inicio de la expansión gradual, y que el plano inclinado terminara con una sobre elevación de  $0.07 \text{ m}$  en el lado izquierdo, mientras que en el lado derecho solo ascendiera  $0.03 \text{ m}$  en total.

Las Figuras 3.6a y 3.6b permiten ilustrar la rampa colocada en el modelo físico. La forma en planta de la superficie de la fosa de erosión fue menor, en comparación con el caso presentado en Caballero *et al.*, (2023), en el que no se colocó ninguna estructura deflectora.



**Figura 3.6a** Efecto de la rampa con inclinación oblicua al eje. *Fuente: foto tomada por el autor*



**Figura 3.6b** Vista de la fosa de erosión, sin agua. *Fuente: foto tomada por el autor*

Sin embargo, la profundidad de la erosión fue del mismo orden que sin rampa, (aproximadamente de 0.10 m), lo que permite concluir que la colocación de la rampa no es útil para reducir la magnitud de la profundidad de la erosión local, aunque con esta estructura se logra eliminar por completo la zona de separación del flujo en el tramo de la expansión.

Además, se hicieron otras pruebas con esta misma estructura deflectora, en las que fueron modificadas las elevaciones de los extremos laterales al final de la rampa, es decir, en el lado de aguas abajo. Los resultados obtenidos indican que estos cambios tienen influencia en las dimensiones horizontales de la fosa de erosión, pero no son significativos con respecto a la profundidad erosionada. Por ejemplo, en el caso de que el lado derecho de la rampa inicie y termine sin modificar su elevación a lo largo de la expansión, el ancho de la fosa aumenta, pero la profundidad de erosión prácticamente no se modifica, (ver Figura 3.7).



**Figura 3.7** Fosa producida por la rampa deflectora sin pendiente en el lado derecho. *Fuente: foto tomada por el autor*

### 3.2. Estructura deflectora de tres pilas

Una de las estructuras deflectoras recomendadas, que además de eliminar la separación del flujo en expansiones graduales, disipa la energía cinética del flujo, es la propuesta por Smith & Yu (1966). Esta estructura se distingue porque para su empleo se propone la ubicación precisa de tres pilas en el tramo de la expansión gradual con paredes verticales y rectas, con relación de anchos de plantilla  $B/b = 3$ ; además, se propone que las pilas tengan sección cuadrada en planta, cuyos lados deben medir  $0.18 b$  (ver Figura 2.8).

En el caso que se estudia en este trabajo, se tiene que  $b = 0.27 m$ ; según la recomendación de Smith & Yu (1966), cada lado de las pilas con sección de forma cuadrada en planta, deben medir  $0.05 m$ , y altura de  $0.12 m$ , cuyo valor es aproximadamente igual al del tirante del flujo ( $y_o \approx 0.10 m$ ).

En la Figura 3.8 se ilustra la estructura deflectora recomendada por Smith & Yu (1966).



**Figura 3.8** Estructura deflectora con pilas de 0.05 m de lado. *Fuente: foto tomada por el autor*

Durante la prueba experimental se observó que con la estructura deflectora empleada, también desaparece la zona de separación; sin embargo, el proceso de erosión persiste, como se indica en la Figura 3.9, aunque las dimensiones horizontales y la profundidad de la fosa de erosión son menores, lo cual se puede apreciar en la misma fotografía.



**Figura 3.9** Fosa de erosión obtenida con las pilas de 0.05 m de lado. *Fuente: foto tomada por el autor*

Estos resultados permitieron considerar la posibilidad de acorazar la superficie del cauce que es erosionada por el flujo; es decir, cubrir la superficie que es erosionada, con material de cierto peso y tamaño, para que la velocidad del flujo no lo pueda remover, arrastrar y mucho menos que sea puesto en suspensión, y en consecuencia que sea transportado por el flujo.

Al respecto, se considera que la literatura es escasa; por ejemplo, Thompson & Kilgore (2006) presentan métodos (de prueba y error), para calcular el tamaño de los elementos de la coraza; Garde & Ranga Raju (2015, p. 602) comentan que el criterio de la velocidad permisible es más empleado que el del esfuerzo cortante crítico. En el subcapítulo siguiente se presenta un procedimiento alternativo, que se basa en el concepto de la velocidad crítica de inicio de arrastre de material granular.

### 3.3. Colocación de una coraza en la superficie del cauce

En este caso, para seleccionar el tamaño y peso del material que formará la coraza, se toma en cuenta la escala geométrica del modelo físico, y la superficie que se debe cubrir para evitar el proceso de erosión en la descarga del canal, y por tanto la formación de la fosa de erosión.

#### 3.3.1. Tamaño de los elementos de la coraza del modelo físico

Una manera de calcular el tamaño de los elementos que deben formar la coraza, consiste en emplear el concepto de inicio de arrastre propuesto originalmente por Shields (1936). García & Maza (1997) presentan con detalle las formulaciones que se emplean para el cálculo del esfuerzo cortante permisible. Una reseña de los artículos publicados que tratan con este concepto se presenta en Guo (2002). Sin embargo, criterios como el de Shields tienen como base el concepto fundamental del flujo uniforme (Shields, 1936, p. 6 y pp. 7 - 8; y Chow, 1959, p. 94). Así, el empleo del criterio de Shields requiere como dato la pendiente de la plantilla del canal. En el caso que se estudia en este trabajo, no hay condiciones de flujo uniforme, puesto que el tramo de la expansión gradual corresponde a un canal no prismático con plantilla horizontal; además, en el tramo se presenta una zona de separación de flujo; por ello, se ha preferido emplear el concepto de la velocidad crítica (criterio recomendado por Garde & Ranga Raju (2015, p. 602)), cuyos métodos de cálculo también están ampliamente explicados en García & Maza (1997); las correspondientes fórmulas requieren los valores de las variables siguientes: el tirante,  $y_0$ , que se tiene en donde inicia la superficie a acorazar; la densidad relativa,  $S_s$ , del material de la coraza; un diámetro característico,  $D_{sm}$ , del material de la coraza; y la constante de la aceleración de la gravedad.

Se tiene la fórmula propuesta por García & Maza (1997); para  $y_0/D_{sm} \leq 744.1877$

$$\frac{U_c}{\sqrt{(S_s-1)g D_{sm}}} = 1.63 \left( \frac{y_0}{D_{sm}} \right)^{0.1283} \quad (3.1)$$

Caballero *et al.*, (2023) reportan que en donde termina la expansión gradual del canal revestido de concreto e inicia la superficie a acorazar, la velocidad máxima del flujo es del orden de  $V_0 \approx 0.30 \text{ m/s}$ , con tirante  $y_0 \approx 0.10 \text{ m}$ . Esta velocidad del flujo es con la que se produce la fosa de erosión en el lecho arenoso (sin ninguna estructura deflectora).

Con respecto al material para acorazar el cauce (en el modelo físico), se consiguió uno del tipo granular, adquirido de la desembocadura de uno de los ríos que llegan a la bahía Temalcatepec, que está entre los estados de Guerrero y Michoacán. En la Figura 3.10 se presenta una parte del material empleado para formar la coraza. Este material también es conocido como grava de río.



**Figura 3.10** Detalle de la forma y dimensiones de los elementos de la coraza. *Fuente: foto tomada por el autor*

El material fue llevado al laboratorio de Mecánica de Suelos que pertenece a la Coordinación de Geotecnia, del IIUNAM; con base en los correspondientes estudios se reportó que la densidad relativa del material es  $S_s = 2.69$ .

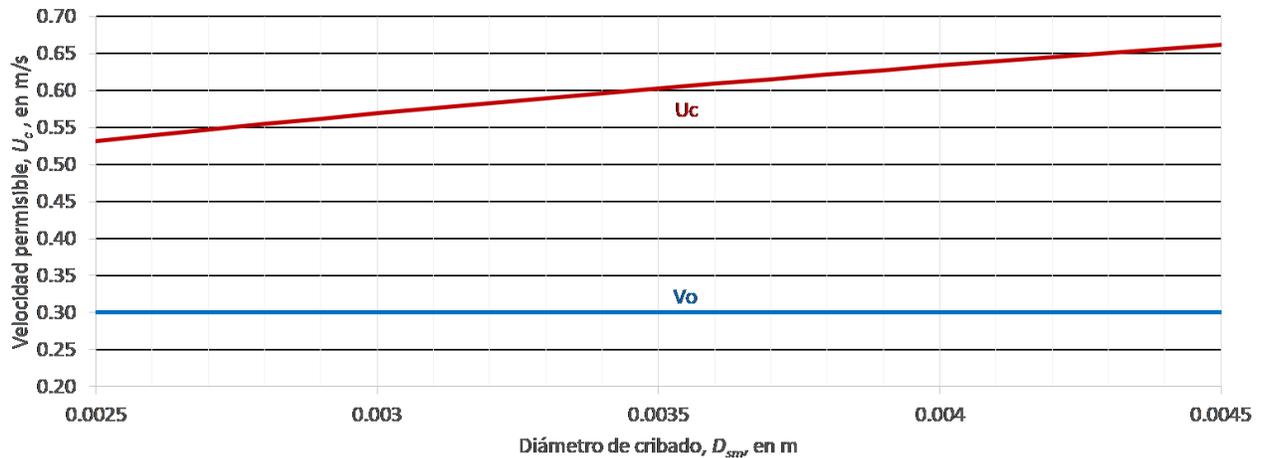
Por simple inspección visual del material, en cuanto a sus dimensiones, se observó que el tamaño característico del material granular, en cuanto a su menor longitud lateral, es del orden de  $0.003 \text{ m}$ ; además, para la Ciudad de México, la aceleración gravitatoria es  $g \cong 9.79 \text{ m s}^{-2}$ . Estos valores fueron empleados para calcular la velocidad permisible del material, como sigue: para  $D_{sm} = 0.003 \text{ m}$

$$y_0/D_{sm} = 0.10/0.003 = 33.33 \leq 744.1877$$

El cumplimiento de la desigualdad anterior permite emplear la ec. 3.1 para calcular la magnitud de la velocidad permisible, a partir de la cual el flujo es capaz de mover y arrastrar al material granular. Al sustituir los correspondientes valores en la ec. 3.1, y después de realizar las operaciones aritméticas, se obtiene la velocidad permisible del material, en función del diámetro  $D_{sm}$ , (ver García & Maza, 1997).

$$U_c = 1.63 \left( \frac{0.10}{D_{sm}} \right)^{0.1283} \sqrt{16.5451 D_{sm}}$$

En la Figura 3.11 se presenta la curva calculada con la expresión anterior, para  $0.0025 \leq D_{sm} \leq 0.0045 \text{ m}$ ; además, en la misma figura se incluye la velocidad media máxima del flujo, que es  $V_0 \approx 0.30 \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 3.11** Velocidad permisible en función del diámetro  $D_{sm}$ .

Al comparar los resultados mostrados en la Figura 3.11, se deduce que al colocar una coraza, cuyos elementos con diámetro característico de cribado estén en el intervalo  $0.0025 \leq D_{sm} \leq 0.0045$  m, la velocidad que resiste ese material es del orden del doble de la velocidad media máxima del flujo que descarga la expansión gradual, es decir  $U_c \cong 2 V_o$ ; esto implica que se tiene un factor de seguridad del orden de dos, con respecto a las características del material de la coraza.

Estos resultados fueron empleados para seleccionar dos charolas de cribado, útiles para separar el material que formará la coraza. Así, se decidió emplear las charolas No. 4 y No. 8, con tamaño de tamiz 4.76 mm y 2.38 mm, respectivamente (ver Figura 3.12).



**Figura 3.12** Charolas empleadas para seleccionar el tamaño del material de la coraza. Fuente: foto tomada por el autor

Durante el proceso de cribado, se seleccionó el material que pasó la malla No.4, y que fue retenido en la malla No.8. Este proceso de selección del material, permite considerar que el tamaño medio representativo del material es, en promedio, del orden de  $D_{sm} \approx 3.6 \text{ mm}$ .

En la Figura 3.13 se ilustra la superficie de la base arenosa en la que se colocó la coraza; el espesor de la coraza en su primera parte fue del orden de  $0.02 \text{ m}$ , mientras que en la parte de menor profundidad el espesor fue de  $0.01 \text{ m}$ .



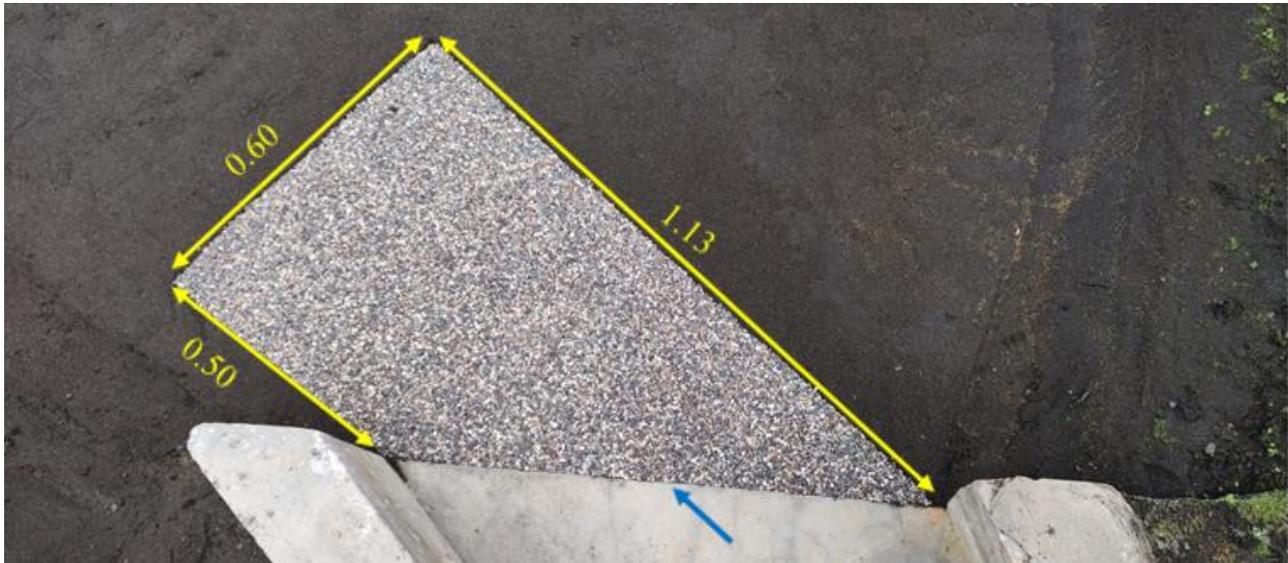
**Figura 3.13** Superficie a acorazar. *Fuente: foto tomada por el autor*

Se aclara que cuando se coloca una coraza, se recomienda incluir un filtro, que consiste en una capa de material graduado de menor tamaño que el de la coraza, debajo de ella, para proteger del proceso de erosión al material original del cauce. Algunas recomendaciones para los elementos que forman el filtro y su espesor se pueden consultar, por ejemplo, en Simons & Sentürk (1992, p. 419) y Garde & Ranga Raju (2015, p. 603 y 604).

En la Figura 3.14 se presentan las dimensiones de la superficie acorazada con la piedra de río, cuyo tamaño característico pertenece al intervalo  $0.00238 \leq D_{sm} \leq 0.00476 \text{ m}$ .

La experiencia adquirida durante las primeras pruebas experimentales, permitió considerar la necesidad de aumentar la superficie acorazada, en una longitud del orden de  $0.50 \text{ m}$ , en el sentido del flujo principal; por tanto, la dimensión de  $0.50 \text{ m}$  que se indica en la Figura 3.14, quedó finalmente de  $1.00 \text{ m}$  (ver Figura 3.15).

La Figura 3.15 es útil para mostrar las condiciones de la coraza al final de la prueba experimental, la cual duró del orden de  $2 \text{ h}$ . Con fines demostrativos, esta misma prueba se repitió varias veces; en cada una de las repeticiones, se tuvo el cuidado de que se tuviera un nivel del agua mayor que  $0.035 \text{ m}$  en la superficie acorazada, antes de iniciar cada una de las nuevas pruebas; esto fue para evitar un efecto de erosión que no corresponde al funcionamiento hidráulico del prototipo.



**Figura 3.14** Dimensiones de una parte de la superficie acorazada, en m. Fuente: foto tomada por el autor



**Figura 3.15** Condiciones de la superficie acorazada, casi al final del experimento. Fuente: foto tomada por el autor

La Figura 3.16 permite mostrar las condiciones finales de la superficie acorazada, sin el efecto de reflejo en el espejo del agua. De esta manera queda demostrado que la colocación de la coraza en el modelo físico, evita la formación de la fosa de erosión en la descarga del canal, en cuyo tramo final se tiene una expansión gradual, con la presencia de la zona de separación del flujo.



**Figura 3.16** Condiciones de la superficie acorazada, sin espejo de agua. *Fuente: foto tomada por el autor*

Las Figuras 3.17 permiten comparar la influencia de la coraza en el comportamiento del cauce en el tramo inmediato aguas abajo de las descargas de sendos canales, del modelo físico de la estructura de control El Macayo.

Por último, es recomendable determinar el tamaño de los elementos que formarían la coraza en el prototipo; el procedimiento de cálculo se describe a continuación.



**Figuras 3.17** Sin coraza (izquierda), con coraza (derecha). *Fuente: foto tomada por el autor*

### 3.3.2. Cálculo del tamaño de los elementos de la coraza para el prototipo

Se emplean las fórmulas que relacionan las dimensiones del prototipo con las del modelo físico. La deducción de las ecuaciones básicas se puede consultar, por ejemplo, en Vergara (1993) o Echávez (1996), entre otros.

Conviene recordar que la escala del modelo físico es 1:60, sin distorsión; por ello, la escala geométrica o de líneas es ( $E_L = 60$ ).

La relación de fuerzas o pesos gravitacionales,  $E_W$ , es

$$E_W = E_L^3 = \frac{W_{sp}}{W_{sm}} \quad (3.2)$$

En la ec. 3.2,  $W_{sp}$  es el peso de los elementos de la coraza del prototipo, en  $N$ ; y  $W_{sm}$  es el peso de los elementos de la coraza en el modelo físico, en  $N$ . Es común que en la deducción de la ec. 3.2 se considere que tanto la densidad del agua como la constante de la aceleración de la gravedad tienen los mismos valores, respectivamente, en el prototipo y en el modelo físico. También es adecuado considerar que los pesos volumétricos del material de la coraza, en el prototipo,  $\gamma_{sp}$ , y en el modelo físico,  $\gamma_{sm}$ , son iguales; es decir,  $\gamma_s = \gamma_{sp} = \gamma_{sm}$ . Por tanto

$$\gamma_s = \frac{W_{sp}}{V_{sp}} = \frac{W_{sm}}{V_{sm}} \quad (3.3)$$

Donde  $V_{sp}$  es el volumen de los sólidos en la coraza del prototipo, en  $m^3$ ; mientras que  $V_{sm}$  es el volumen de sólidos de la coraza en el modelo físico, en  $m^3$ ; en cuanto al peso volumétrico, sus unidades en el Sistema Internacional son  $N m^{-3}$ .

Una alternativa para calcular el volumen de un elemento del material de la coraza del modelo físico, consiste en considerar que es aproximadamente igual al de una esfera, de diámetro  $D_{sm}$  (radio  $r_{sm} = D_{sm}/2$ ) en  $m$ ; así, el volumen de un elemento sólido de la coraza, en el modelo físico, se calcula como sigue

$$V_{sm} = \frac{4}{3} \pi r_{sm}^3 \quad (3.4)$$

El peso del volumen de un sólido de la coraza del modelo físico se obtiene como

$$W_{sm} = \gamma_s V_{sm} = \gamma_s \left( \frac{4}{3} \pi r_{sm}^3 \right) \quad (3.5)$$

De igual manera que en la ec. 3.5, para el material de la coraza del prototipo se tiene que

$$W_{sp} = \gamma_s V_{sp} = \gamma_s \left( \frac{4}{3} \pi r_{sp}^3 \right) \quad (3.6)$$

Al sustituir  $W_{sm}$  y  $W_{sp}$ , de las ecs. 3.5 y 3.6 en la ec. 3.2, y después de simplificar se obtiene la igualdad siguiente

$$r_{sp} = E_L r_{sm} \quad (3.7)$$

En la ec. 3.7,  $r_{sp}$  es el radio de una esfera que representa el material de la coraza para el prototipo, en  $m$ .

Es conveniente recordar que el resultado obtenido del proceso de cribado del material de la coraza del modelo físico, permite considerar que el diámetro característico de ese material pertenece al intervalo  $0.0025 \leq D_{sm} \leq 0.0045 \text{ m}$ , ( $D_{sm} = 2r_{sm}$ ); por tanto, con base en la ec. 3.7, el diámetro característico del material de la coraza en el prototipo debe estar en el intervalo  $0.15 \leq D_{sp} \leq 0.27 \text{ m}$ .

La revisión del cálculo del tamaño de los elementos de la coraza para el prototipo es sencillo; para ello se tienen como datos: el diámetro medio característico,  $D_{sp} = 0.216 \text{ m}$ ; la densidad relativa del mismo material,  $S_s = 2.69$ ; la aceleración de la gravedad,  $g = 9.79 \text{ m s}^{-2}$ ; y el tirante del flujo en el prototipo,  $y_{op} = 6 \text{ m}$ .

Primero se revisa la desigualdad siguiente

$$y_{op}/D_{sp} = 6/0.216 = 27.78 \leq 744.1877$$

El cumplimiento de la desigualdad calculada, permite emplear la expresión para calcular la velocidad crítica de la coraza en el prototipo

$$U_{cp} = 1.63 \left( \frac{y_{op}}{D_{sp}} \right)^{0.1283} \sqrt{(S_s - 1) g D_{sp}} = 4.718 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La velocidad del flujo en el prototipo se calcula con la expresión siguiente (Vergara, 1993 o Echávez, 1996)

$$U_{op} = \sqrt{E_L} U_o = \sqrt{60}(0.30) = 2.32 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

En conclusión, la velocidad del flujo en el prototipo es casi de la mitad de la velocidad crítica o permisible que resiste el material de la coraza; así, se tiene un factor de seguridad de 2.

Una alternativa de obtener el material para la coraza del prototipo, consiste en hacer un análisis de factibilidad, que permita conocer la conveniencia de fabricar dichos elementos cerca de la estructura hidráulica.

*Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco*

## 4. Conclusiones y recomendaciones

Se conoce la existencia de diferentes estructuras deflectoras recomendadas para evitar la separación del flujo en expansiones graduales; entre ellas destacan: la colocación de vanos, también conocidos como muros guía; el empleo de bloques como los que se usan en tanques para disipación de energía, cuya forma en planta es cuadrada o triangular; umbrales con forma de prisma rectangular, a lo ancho de la plantilla del canal; plantilla del canal con pendiente adversa a lo largo de la expansión gradual. Estas estructuras evitan la formación de la zona de separación del flujo en tramos con expansiones graduales; sin embargo, ninguna de ellas tiene la suficiente capacidad para disipar la energía del flujo y evitar que la superficie del cauce sea erosionada, y en consecuencia se forme una fosa de erosión; para mayores intensidades del flujo es posible que se llegue a un proceso de socavación local.

Los resultados experimentales obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo, indican que la mejor manera de evitar el proceso de erosión del cauce en la descarga de un canal, en cuyo tramo final hay una expansión gradual, se basa en acorazar la superficie del cauce que es susceptible de ser erosionada, permitiendo la formación de una zona de separación de flujo, la cual es común que se presente en cualquier expansión gradual.

Se presenta una alternativa para calcular las características de los elementos que deben formar la coraza, tanto para el modelo físico como para el prototipo. El empleo de esta alternativa requiere que se conozca la velocidad media máxima del flujo en la sección transversal con la que termina la expansión gradual. Una manera de obtener un valor suficientemente aproximado de la velocidad media máxima, consiste en emplear un sistema de modelación matemática para flujo bidimensional horizontal; otra se basa en el empleo de un modelo físico, como en el caso que se estudia en el presente trabajo.

Se aclara que cuando se tiene la expansión gradual de un tramo de canal que forma parte de un sistema de riego, se debe tratar de que en la expansión se tenga la menor pérdida de energía, y que la distribución de velocidades al final de la transición cumpla lo mejor posible con el concepto de flujo unidimensional; en cambio, cuando la expansión forma parte del tramo final de una estructura de

control que descarga a un río, es importante que además de evitar la formación de la separación del flujo, la pérdida de energía sea notable, puesto que ambos efectos contribuyen a disminuir el efecto de erosión local en la descarga del canal.

## 5. Referencias (citadas en este texto)

- Alauddin, M., & Basak, B. C. (2006). Development of an expansion transition in open channel subcritical flow, *Journal of Civil Engineering*, 34(2), 91–101.
- Basak, B. C., & Alauddin, M. (2010). Efficiency of an expansive transition in an open channel subcritical flow, *DUET Journal*, 1(1), 27–32.
- Caballero, C., Mendoza, A., Berezowsky, M., & Jiménez, C. A. A. (2023). Numerical-Experimental Study of Scour in the Discharge of a Channel: Case of the Carrizal River Hydraulic Control Structure, Tabasco, México, *Water*, 15, 2788. <https://doi.org/10.3390/w15152788>.
- Chaturvedi, R. S. (1963). Expansive sub-critical flow in open channel transitions, *Journal of the Institution of Engineers, Civil Engineering Division*, India, 43(9), 447.
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, New York
- Echávez, A. G. (1996). *Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental*, UNAM, México.
- Formica, G. (1955). Esperienze preliminari sulle perdite di carico nei canali, Dovute a cambiamenti di sezione, *L' Energia Elettrica*, Milano, 32(7), 554-567.
- García, F. M., & Maza, A. J. A. (1997). Inicio de Movimiento y Acorazamiento. Capítulo 8 del Manual de Ingeniería de Ríos, *Serie Azul*, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Garde, R. J., & Ranga Raju, K. G. (2015). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. New Age International. Revised Third Edition, India.
- Garde, R. J., Ranga Raju, K. G., & Misra, R. C. (1979). Subcritical flow in an open channel expansion, *Journal of Irrigation and Power*, CBIP, India, 36(1).
- Guo, J. (2002). Hunter Rouse and Shields Diagram, *Advances in Hydraulics and Water Engineering, Proc. 13 th IAHR-ADP Congress*, Vol. 2 World Scientific, Singapore [https://doi.org/10.1142/9789812776969\\_0200](https://doi.org/10.1142/9789812776969_0200).
- Haque, A. (2008). *Some Characteristics of Open Channel Transitions Flow* (Tesis de Maestría), Building, Civil, and Environmental Engineering, Concordia University, Montreal, Canada.

- Hartley, G. E., Jain, J. P., & Bhattacharya, A. P. (1940). *Report on the model experiments of fluming of bridges on Purwa branch*, Technical Memorandum. 9, United Provinces Irrigation Research Institute, Lucknow (now at Roorkee), India, pp 94-110.
- Hashimi, S. A. H. (1966). *Open channel expansions for subcritical flow* (Tesis de Maestría), University of Arizona, Tucson.
- Hinds, J. (1928). The Hydraulic Design of Flumes and Syphon Transitions, *Transactions, American Society of Civil Engineers*, 92, 1423-1459.
- Isbash, S. V., & Lebedev, I. V. (1961). Change of natural streams during construction of hydraulic structures. *Proc., 9th Congress of IAHR*, 1114–1121. Belgrade, Yugoslavia: Yugoslav Association for Hydraulic Research.
- Jiménez, C. A. A. (2023). *Calibración y verificación de las leyes de descarga de una estructura de control*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Kulandaiswamy, V. C., & Narayanan, M. (1967). Discussion of Use of baffles in open channel expansions, by Smith. C. D., & Yu, J. N. G. (1966). *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 93(1), 81-85.
- Li, A., Melville, B. W., Yang, Y., Gao, L., Shamseldin, A. Y., & Zhang, G. (2024). Improved estimation of critical bed shear stress downstream of low-head weirs in streams with coarse bed material, *International Journal of Sediment Research*, <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.03.009>
- Li, S. S., Thapa, D. R., & Ramamurthy, A. S. (2019). Using Vanes to Reduce Flow Separation and Head Loss in Warped Transition, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 145(2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001368](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001368).
- López, Z. A. (2024). *Balance sedimentológico en el Mezcalapa* (Tesis de Maestría), Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Mazumder, S. K. (1967). *Design of Wide-angle Open Channel Expansions in Subcritical Flow by Control of Boundary Layer Separation with Triangular Vanes* (Tesis de Doctorado), Indian Institute of Technology, India.
- Mazumder, S. K. (1988). Instability of Flow Downstream of Hydraulic Structures. *Proc. of 6th Congress, IAHR*, Kyoto, Japan.
- Mazumder, S. K. (1989). Discussion of Subcritical flow in rigid-bed open channel expansions, by Nashta, C. F. & Garde, R. J. (1988). *Journal of Hydraulic Research*, 27(4), 556-558.
- Mazumder, S. K., & Darde, P. N. (1994). Control of Separation in Open Channel Sub-critical Expansion with Adverse Bed Slope. *Proc. VIII Congress of APD-IAHR, VoL II*, Singapore.
- Mazumder S. K., & Pramod Kumar. (2001). Sub-critical flow behaviour in a straight expansion, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 7(1), 40-50.
- Mazumder, S. K., & Rao, J. V. (1971). Use of short triangular vanes for efficient design of wide-angle open channel expansion, *Journal of Institution of Engineers (India)*, 51(9), Pt CI 5.
- Mishra, R. C. (1977). *Sub-critical flow in an open channel expansion* (Tesis de Maestría), University of Roorke, Roorke, India.

- Mitra, A. C. (1940). *Report on the model experiments of fluming of bridges on Purva branch*, Technical Memorandum, No. 9. Roorkee, India: United Provinces Irrigation.
- Najafi-Nejad-Nasser, A., & Li, S. S. (2015). Reduction of flow separation and energy head losses in expansions using a hump, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 141(3).
- Najmeddin, S., & Li, S. S. (2016). Numerical Study of Reducing the Flow Separation Zone in Short Open-Channel Expansions by Using a Hump, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 142(7).
- Narayanan, M. (1963). Subcritical expansions (Thesis of Master of Science), University of Madras, Madras, India.
- Nashta, C. F., & Garde, R. J. (1988). Subcritical Flow in rigid-bed open channel expansions, *Journal of Hydraulic Research*, 26(1), 49-65.
- Prandtl, L. (1905). Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. In *Verhandlungen des III. Internationalen Mathematiker-Kongresses*, Heidelberg, 484–491. *LPGA 2*, 575–584.
- Rao, B. V., Galay, V. J., & Nimmo, W. H. R. (1966). Discussion of Use of baffles in open channel expansions, by Smith, C. D., & Yu, J. N. G. (1966). *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 92(6), 212-213.
- Rao, B. V., & Seetharamaiah, K. (1969). Separation Control Devices in Divergin Channels, *Proceedings of the 13 th Congress of IAHR*, Vol. 1, paper 14, pp 113-122.
- Ramamurthy, A. S., Basak, S., & Rao, P. R. (1970). Open Channel expansions fitted with local hump, *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 96(5), pp 1105-1113
- Ramamurthy, A. S., Thapa, D. R., & Li, S. S. (2017). Experimental Study of Flow past a Warped Transition, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 143(8), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001200](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001200).
- Seetharamiah, K., & Ramamurthy, A. S. (1968). Triangular sills in open channel expansions, *Civil Engineering and Public Works Review*, 63, 283.
- Shields, A. (1936). *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung*, Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Germany.
- Simons, D. B., & Sentürk, F. (1992). *Sediment transport technology, Water and sediment dynamics*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.
- Skogerboe, G. V., Austin, L. H., & Bennet, R. S. (1971). Energy loss analysis for open channel expansions, *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 97(10), 1719-1736.
- Skogerboe, G. V., & Hyatt, M. L. (1966). Discussion of Use of baffles in open channel expansions, by Smith. C. D., & Yu, J. N. G. (1966). *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 92(5), 255-259.
- Smith. C. D., & Yu, J. N. G. (1966). Use of baffles in open channel expansions, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 92(2), 1-17.
- Soliman, M. M. (1966). Discussion of Use of baffles in open channel expansions, by Smith. C. D., & Yu, J. N. G. (1966). *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 92(5,) 259-261.
- Sotelo, A. G. (1976). *Hidráulica General. Fundamentos*, Limusa, México.

- Swamee, P. K., & Basak, B. C. (1991). Design of rectangular open-channel expansion transitions, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 117(6), 827-838.
- Thapa, D. R., Li, S. S., & Ramamurthy, A. S. (2018). Experimental Study of Flow Characteristics in Wedge and Modified Wedge Transitions, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 144(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001487](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001487).
- Thomas, A. R. (1940). Flow in expansions in open channels, *Proceedings Punjab Engineering Congress*, Lahore, India, Paper 236, 23 pp.
- Thompson, P. L., & Kilgore, R. T. (2006). *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels*, Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular Number 14, Third Edition, USA.
- Vergara, S. M. A. (1993). *Técnicas de Modelación en Hidráulica*, Ediciones Alfaomega, S. A. de C. V. México.

# Anexo

## Notación

Escala geométrica o de líneas:  $E_L$

Diámetro de cribado de los sólidos para el modelo físico:  $D_{sm}$

Diámetro de cribado de los sólidos para el prototipo:  $D_{sp}$

Peso de los elementos de la coraza del modelo físico:  $W_{sm}$

Peso de los elementos de la coraza del prototipo:  $W_{sp}$

Peso volumétrico del material sólido:  $\gamma_s$

Peso volumétrico del material de la coraza del modelo físico:  $\gamma_{sm}$

Peso volumétrico del material de la coraza del prototipo:  $\gamma_{sp}$

Radio de una esfera para el modelo físico:  $r_{sm}$

Radio de una esfera para el prototipo:  $r_{sp}$

Relación de fuerzas o pesos gravitacionales:  $E_W$

Tirante del flujo en el modelo físico:  $y_o$

Tirante del flujo en el prototipo:  $y_{op}$

Velocidad del flujo en el modelo físico:  $U_0$

Velocidad del flujo en el prototipo:  $U_{0p}$

Volumen de los sólidos en la coraza del modelo físico:  $V_{sm}$

Volumen de los sólidos en la coraza del prototipo:  $V_{sp}$

Las Series del Instituto de Ingeniería describen los resultados de algunas de las investigaciones más relevantes de esta institución. Con frecuencia son trabajos in extenso de artículos que se publican en revistas especializadas, memorias de congresos, etc.

Cada número de estas Series se edita con la aprobación técnica del Comité Editorial del Instituto, basada en la evaluación de árbitros competentes en el tema, adscritos a instituciones del país y/o el extranjero.

Actualmente hay tres diferentes Series del Instituto de Ingeniería:

### **SERIE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**

Incluye trabajos originales sobre investigación y/o desarrollo tecnológico. Es continuación de la Serie Azul u Ordinaria, publicada por el Instituto de Ingeniería desde 1956, la cual actualmente tiene nueva presentación y admite textos en español e inglés.

### **SERIE DOCENCIA**

Está dedicada a temas especializados de cursos universitarios para facilitar a estudiantes y profesores una mejor comprensión de ciertos temas importantes de los programas de estudio.

### **SERIE MANUALES**

Abarca manuales útiles para resolver problemas asociados con la práctica profesional o textos que describen y explican el estado del arte o el estado de la práctica en ciertos temas. Incluye normas, manuales de diseño y de laboratorio, reglamentos, comentarios a normas y bases de datos.

**Las Series del Instituto de Ingeniería pueden consultarse gratuitamente desde la dirección electrónica del Instituto <http://www.ii.unam.mx> (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarnpublicacion.aspx>) y pueden grabarse o imprimirse en formato PDF desde cualquier computadora.**

